

**SEMINAIRE REGIONAL IFDC-AFRIQUE SUR L'EMPLOI DES RESSOURCES
MINERALES LOCALES POUR UNE AGRICULTURE DURABLE EN AFRIQUE DE
L'OUEST.**

Lomé, TOGO - 21-23 Novembre 1994

**PETITES UNITES DE PRODUCTION D'ENGRAIS, A BASE DE PHOSPHATES
BRUTS ET PARTIELLEMENT SOLUBILISES**

PAR

TRUONG Binh et Christian FAYARD

**CIRAD-CA
B.P. 5035
34032 Montpellier, FRANCE**

**TECHNIFERT S.A.
B.P. 61
35406 Saint Malo, FRANCE**

PETITES UNITES DE PRODUCTION D'ENGRAIS, A BASE DE PHOSPHATES BRUTS ET PARTIELLEMENT SOLUBILISES

1. INTRODUCTION

Les procédés de fabrication d'engrais phosphatés sont bien connus depuis longtemps, ils permettent de produire selon les caractéristiques des matières premières (minerais et acides), les conditions d'utilisation et la demande du marché :

- des phosphates bruts moulus (PB)
- des phosphates partiellement solubilisés (PPS)
- des phosphates solubles, supersimple (SSP), supertriple (TSP), mono et diammonique (MAP, DAP)....

Les phosphates bruts et partiellement solubilisés sont moins utilisés que les solubles mais, occupent une place non négligeable dans certains pays d'Europe, d'Amérique du Sud, d'Asie du Sud Est, en particulier pour les sols acides, avec une pluviométrie suffisante, sur des cultures peu exigeantes. Dans ces conditions, l'efficacité agronomique est pratiquement équivalente à celle des phosphates solubles, pour un coût plus faible.

Pour atteindre ces deux objectifs : efficacité agronomique et économie des coûts de production, des études de base sont nécessaires :

- caractérisation de la demande en engrais, sur le plan quantitatif et qualitatif, zonage agro-pédo-climatique des lieux d'utilisation, en vue de bien cerner les contraintes et les besoins,
- caractérisation des matières premières disponibles pour essayer de mieux les valoriser,
- mise au point des procédés de fabrication les plus adaptés à ces caractéristiques.

L'objet de cette note est de passer en revue les différentes phases des études, en s'appuyant sur deux exemples : le Burkina Faso et le Mali, où des études de pré faisabilité pour le montage d'unités de production d'engrais à base de phosphates naturels locaux, ont été

réalisées en 1992 et 1993. (7, 21).

II. ESTIMATION DES BESOINS EN ENGRAIS

Comme pour tout projet industriel, il est primordial de bien cerner le marché, les caractéristiques de la demande, quantité, qualité, équilibre des éléments, saisonnalité de la consommation, présentation des produits, tout ce qui conditionne le dimensionnement et l'organisation de l'unité de production.

2.1. Besoins globaux

Ils peuvent être estimés à partir des surfaces cultivées, ils sont en général très importants si l'on prend en compte toutes les cultures, mais ils ne sont pas réalistes, en particulier en Afrique de l'Ouest où il n'existe pas de financement pour les couvrir, ni d'infrastructures pour leur distribution.

Malgré tout, le calcul des exportations des cultures constitue une base de raisonnement utile, en effet ce sont ces quantités qui quittent les champs chaque année, voici quelques exemples :

	BURKINA FASO	MALI
Unités fertilisantes ($N+P_2O_5+K_2O$)	167000 T	205000 T
Equivalents engrais	340000 T	462000 T

Certes des compensations existent, apports par les pluies, les fixations biologiques, les résidus de récoltes, sous formes de composts, brûlis, fumier... mais ces quantités sont très variables et difficilement chiffrables.

Inversement d'autres phénomènes naturels mais dont l'homme est aussi responsable, comme le ruissellement, la lexiviation, l'érosion, peuvent entraîner des pertes importantes dont certains auteurs les estiment plus élevées que les exportations par les cultures.

La fertilisation minérale constitue par contre une compensation quantifiable :

	BURKINA FASO	MALI
Unités fertilisantes	23000 T	28000 T
Equivalents engrais	47000 T	60000 T

Ces apports représentent environ 13 % des exportations par les cultures, de plus ils sont très inégalement répartis, et nettement insuffisants pour maintenir la fertilité des sols, mais ce sont des quantités réellement distribuées et consommées, elles sont donc considérées comme réalistes et retenues éventuellement comme bases pour dimensionner les unités de production.

2.2. Zonage des besoins

S'agissant d'une production d'engrais à base de phosphates locaux, il serait opportun d'élargir la gamme des produits, de régionaliser les besoins en tenant compte des caractéristiques des lieux d'utilisation.

En effet, l'efficacité agronomique des phosphates naturels, bruts ou partiellement solubilisés, dépend certes, de leurs propriétés intrinsèques, mais aussi des conditions d'utilisation, les facteurs les plus importants étant :

- **Les sols** : en particulier l'acidité qui solubilise les phosphates, le taux de saturation du complexe absorbant qui encaisse les produits de solubilité, la matière organique qui protège les fractions de phosphore assimilable.
- **Le climat** : l'humidité du sol favorise la solubilisation des phosphates, mais son excès (hydromorphie) crée des conditions réductrices qui limite la solubilisation, d'autre part l'alternance humidification/dessiccation accélère les réactions avec le sol, en particulier la rétrogradation vers des formes moins solubles par l'inclusion dans des sesquioxydes de fer et d'aluminium.

- **La plante** : par son système racinaire plus ou moins développé qui intercepte les ions phosphatés, son rythme et son intensité d'absorption, ses exudations qui modifient l'équilibre du milieu.

La combinaison de ces facteurs permet de définir des zones d'utilisation (figure 1), par exemple :

- dans les zones ayant des facteurs favorables, sols acides, humidité suffisante, plante à absorption lente, on peut proposer des phosphates peu solubilisés donc plus économiques,
- dans les zones ayant des facteurs peu favorables, sols proches de la neutralité, humidité aléatoire, plantes exigeantes, il faudrait des produits plus solubles.

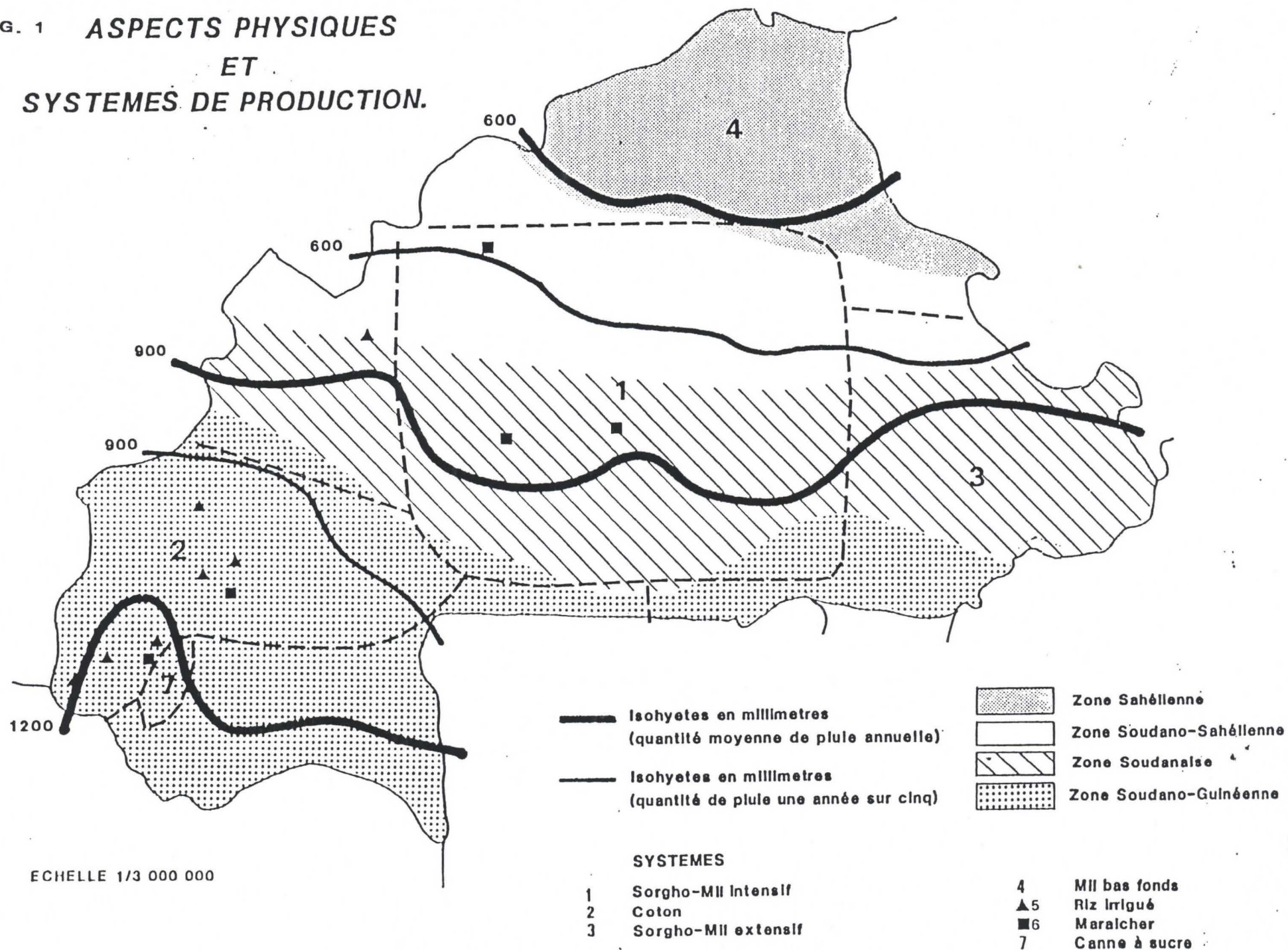
D'autre part on pourrait aussi intégrer les problèmes spécifiques de chaque zone : toxicité aluminique, salinisation, carence en phosphore, calcium, oligo-éléments dans le but de mettre au point des formules d'engrais adaptées à chaque région.

3. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

En Afrique de l'Ouest, les gisements de phosphates naturels identifiés sont d'origine sédimentaire, certains très anciens, du cambrien, d'autres plus récents, du tertiaire (1), plus ou moins compactés, métamorphisés, altérés. Ils possèdent donc des caractéristiques différentes selon leur type de formation et leur histoire géologique, qui induisent des possibilités d'utilisation différentes. Pour les déterminer, des analyses fines ont été réalisées (18, 19) :

- Minéralogie et cristallographie, pour connaître la composition qualitative et quantitative des minéraux : apatite, quartz, oxydes de fer et d'aluminium, calcite, dolomie, gypse... qui orientent des types d'attaque pour économiser de l'acide et éviter la formation de minéraux gênants (tab. 5). D'autre part les degrés de substitution dans les réseaux cristallins de l'apatite renseignent sur la réactivité des phosphates (10).
- Composition chimique des éléments majeurs (P, Ca, Al, Fe, Si...), oligoéléments dont

FIG. 1 ASPECTS PHYSIQUES
ET
SYSTEMES DE PRODUCTION.



certains intéressent l'agriculture (Zn, Co, Ni, Cu....) d'autres pourraient être toxiques (F, Cl, Pb, Cd....). Les différentes teneurs permettent de calculer les ratio d'attaque et la consommation d'acide.

- Solubilité dans différents réactifs, citrate d'ammonium neutre, acide citrique 2 % et acide formique 2%.

Ce dernier étant le plus discriminant, il sert de norme dans la Communauté Européenne, les phosphates naturels doivent avoir au moins 55 % de P_2O_5 soluble dans l'acide formique 2 % pour être utilisé en application directe. Le tableau 1 montre que le phosphate de Tilemsi est le plus tendre, et pourrait être classé dans cette catégorie.

L'extraction pendant des temps limités, 30 min. ou 2 h 00, ne donne pas toujours un aperçu à long terme du potentiel des phosphates, une extraction en continu (Fig. 2) permet de prévoir ce comportement en particulier les pentes correspondant à différents compartiments des phosphates.

- Granulométrie des grains, la dissolution des phosphates dans le sol ou l'acide dépend des surfaces de contact, le tableau 2 montre que le Tilemsi possède la plus grande surface spécifique, ce qui explique en partie sa réactivité élevée. Certaines normes fixent aussi la taille des grains à 63 ou 100 microns pour garantir une certaine surface spécifique, mais la distribution à l'intérieur de cette taille peut être très variable selon les types de phosphates (tab. 3), ainsi le Tilemsi possède des fractions fines plus élevées que les autres phosphates. Cette notion de courbe granulométrique est très importante dans les attaques partielles des phosphates. En effet la quantité d'acide ajoutée étant limitée, il faudrait qu'elle touche le maximum de particules d'une taille déterminée.

La technique de préfragilisation par compactage à sec permet de casser les grains de phosphate selon les lignes de clivage des minéraux, de faire des économies sur le temps et l'énergie de broyage, d'améliorer les courbes granulométriques, et par voie de conséquence

l'efficacité des attaques partielles (fig. 3).

4. ATTAQUE PARTIELLE DES PHOSPHATES

L'objectif est d'augmenter l'efficacité des phosphates durs, peu réactifs, tout en maintenant le coût à un niveau acceptable. Il n'existe pas de principe absolu, ni de règle générale applicable dans tous les cas, nous venons de voir que cette mise au point dépend des caractéristiques des matières premières et des conditions d'utilisation.

4.1. Considérations agronomiques

L'attaque partielle vise à créer un effet starter avec la partie solubilisée qui va faciliter la croissance initiale de la plante et en particulier un meilleur enracinement. Comme le phosphore est très peu mobile dans le sol, plus un système racinaire est développé mieux il intercepte et absorbe les ions phosphatés, et avec le temps même la partie non attaquée serait mieux utilisée.

Il est donc très important qu'un maximum de particules de phosphate soit partiellement solubilisé pour créer une multitude d'effet starter in situ, ce qui suppose une attaque en mouvement et encore mieux en tourbillon et non une attaque en masse.

Ainsi l'attaque partielle n'est pas seulement une étape inachevée de la fabrication du superphosphate, c'est une conception différente, qui demande une évaluation à chaque phase de la démarche : quel taux d'attaque pour quelle efficacité et à quel coût ?

TAB. 1 - SOLUBILITES DANS DIFFERENTS REACTIFS EN % DU P₂O₅ TOTAL

REACTIFS	TILEMSI (MALI)	KODJARI (BURKINA FASO)	TAIBA (SENEGAL)	ANECHO (TOGO)
DILUTION ISOTOPIQUE EN 100 mm	3.87	0.17	0.12	0.28
CITRATE NEUTRE AOAC	13.5	8.0	5.4	4.8
ACIDE CITRIQUE 2 %	38.5	24.5	21.3	21.3
ACIDE FORMIQUE 2 %	61.2	48.4	41.5	40.9

TAB. 2 : SURFACE SPECIFIQUE DES PHOSPHATES EN FONCTION DE LA FINESSE

PHOSPHATES	SURFACE SPECIFIQUE EN m ² /g	
	0.5 mm	0.1 mm
ARLI	3.7	6.4
KODJARI	7.1	10.3
TAHOUA	14.7	19.1
TAIBA	5.4	7.6
TILEMSI	26.4	34.2
TOGO	7.1	9.9

TAB. 3 - ETUDE GRANULOMETRIQUE DES ECHANTILLONS PASSES AU TAMIS DE 100 MICRONS

% CUMULES DES FRACTIONS	TILEMSI	KODJARI	TAIBA	ANECHO
MOINS DE 40 MICRONS	12	7	6	5
MOINS DE 60 MICRONS	60	44	34	36
MOINS DE 80 MICRONS	85	70	56	61
MOINS DE 100 MICRONS	100	100	100	100

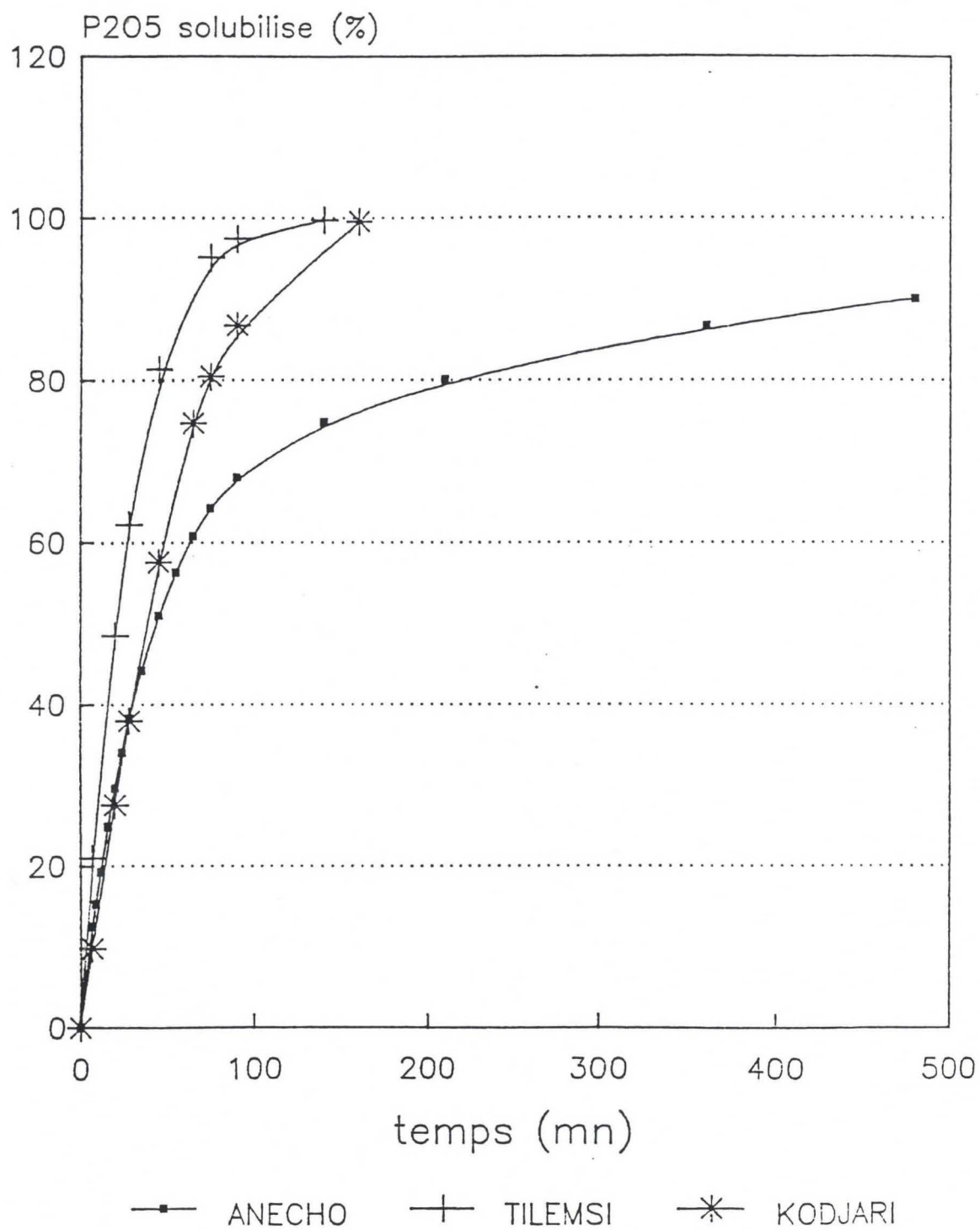
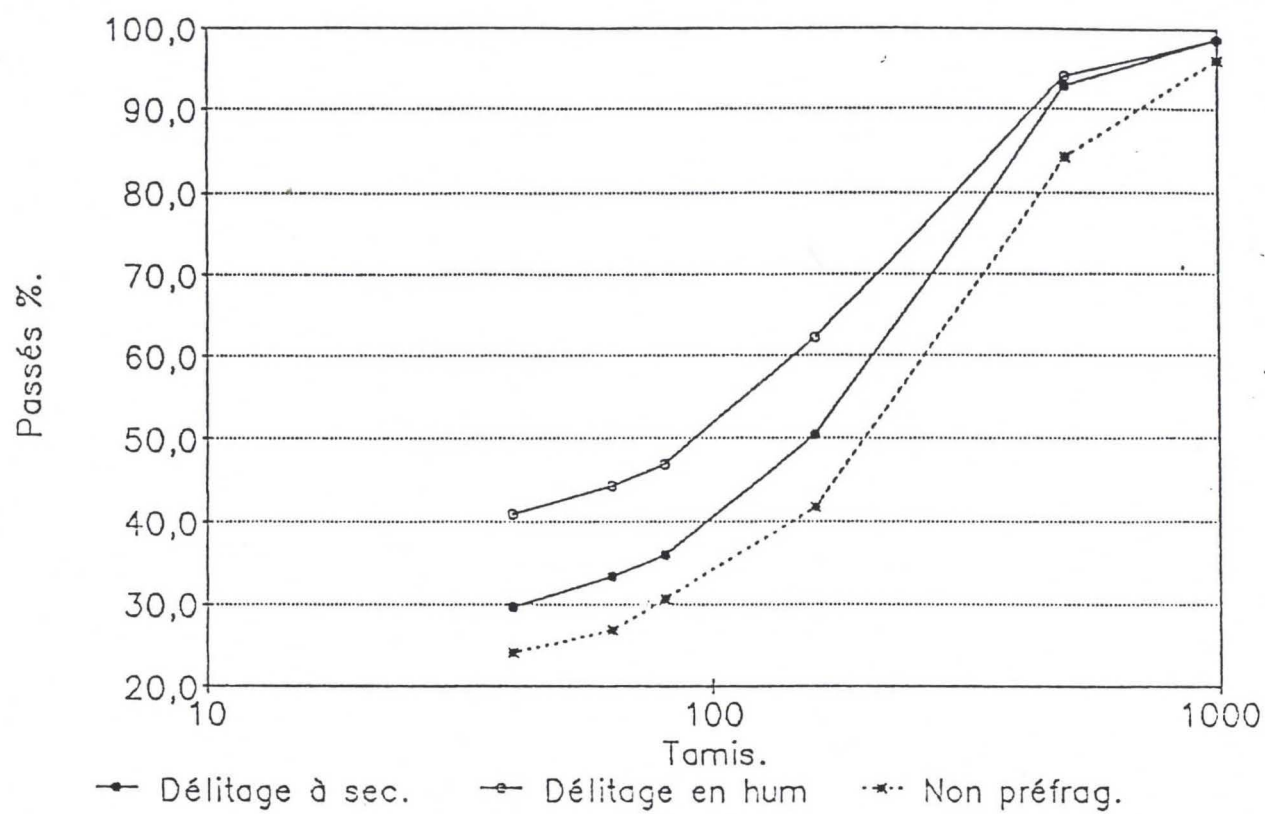
FIG. 2 - SOLUBILITE PHOSPHORIQUE DES MINERAIS

FIG. 3 - PREFRAGILISATION



4.2. Considérations technologiques

On distingue 3 phases principales (fig. 5, 6, 7) :

A. Phase de préparation des produits avant attaque comprenant :

A1. Préparation des produits liquides. (dosage, mélange, réchauffage, dilution, dissolution des produits solides ajoutés, etc...).

A2. Préparation des produits solides (dosage, mélange, broyage, etc...).

B. Phase de réaction entre les produits préparés. La réaction pouvant se faire en continu, en discontinu, et dans les deux cas en étapes successives et posséder une ou plusieurs étapes de maturation des produits ou même une opération de séchage.

C. Phase de mise en forme du produit pour obtenir un produit :

- . Pulvérulent
- . Run of pile
- . Granulé
- . Compacté

Les phases B et C peuvent par moment être réalisées simultanément. (granulation pendant la phase d'attaque)

Pour les études de mise au point les attaques ont été réalisées en variant :

- . la nature des acides , sulfurique, phosphorique, mixte (mélange d'acides sulfurique et phosphorique), complexe (mélange d'acide sulfurique et de sels ammoniacaux),
- . la quantité et la concentration des acides
- . la température et les types de mélange

Le taux d'attaque est défini comme le pourcentage de la quantité d'acide utilisée par rapport à celle requise pour la solubilisation totale.

L'expérience montre que les taux les plus intéressants, c'est à dire donnant de bons rapports efficacité agronomique/quantité d'acide consommée, se trouvent autour de 30 à 40 %. En

effet à ces taux les acides touchent les minéraux phosphatés (apatite) mais très peu les gangues dures comme les silicates.

Les produits sont ensuite évalués en laboratoire (solubilité, composition chimique), en serre (essais en vases de végétation) et aux champs (essais en stations et en milieu paysan).

Les résultats ne sont pas toujours excellents au premier coup, mais à force de patience et de perspicacité, on peut arriver à des résultats satisfaisants pour la plupart des phosphates étudiés, même pour ceux réputés inutilisables selon les techniques traditionnelles.

Ainsi pour le phosphate de Kodjari, l'un des plus durs, les plus chargés en fer et silice, l'attaque phosphorique ne semble pas assez énergique pour solubiliser efficacement l'apatite, par contre l'attaque mixte ou complexe semble donner de bons résultats (tab. 4).

A l'inverse le phosphate du Togo, déjà lavé et épuré (produit marchand), est facile à attaquer et donne dans tous les cas de bons résultats (fig. 4).

Pour le phosphate de Tilemsi, riche en calcium provenant de l'apatite et de la calcite, l'analyse minéralogique des produits attaqués montre la formation d'anhydrite insoluble, en particulier avec l'acide sulfurique (tab. 5). En effet l'attaque n'étant pas complète, il y a réarrangement des minéraux et interactions entre les produits néoformés qui peuvent gêner la libération du phosphore solubilisé. Ainsi certains produits partiellement solubilisés sont moins efficaces que le phosphate brut. Dans ce cas, l'attaque mixte ou complexe est plus indiquée. Compte tenu de la bonne réactivité du phosphate brut, l'attaque partielle est-elle justifiée ?

TAB. 4 - PHOSPHATE DE KODJARI (BURKINA FASO) - Efficacité agronomique de différentes attaques par rapport à un phosphate soluble

PHOSPHATES	% D'EFFICACITE
PHOSPHATE BRUT	19
ATTAQUE SULFURIQUE A 29 %	39
ATTAQUE PHOSPHORIQUE A 12 %	48
ATTAQUE MIXTE SULFURIQUE 18 % + PHOSPHORIQUE (18 %)	85
ATTAQUE COMPLEXE SULFURIQUE (23 %)	87

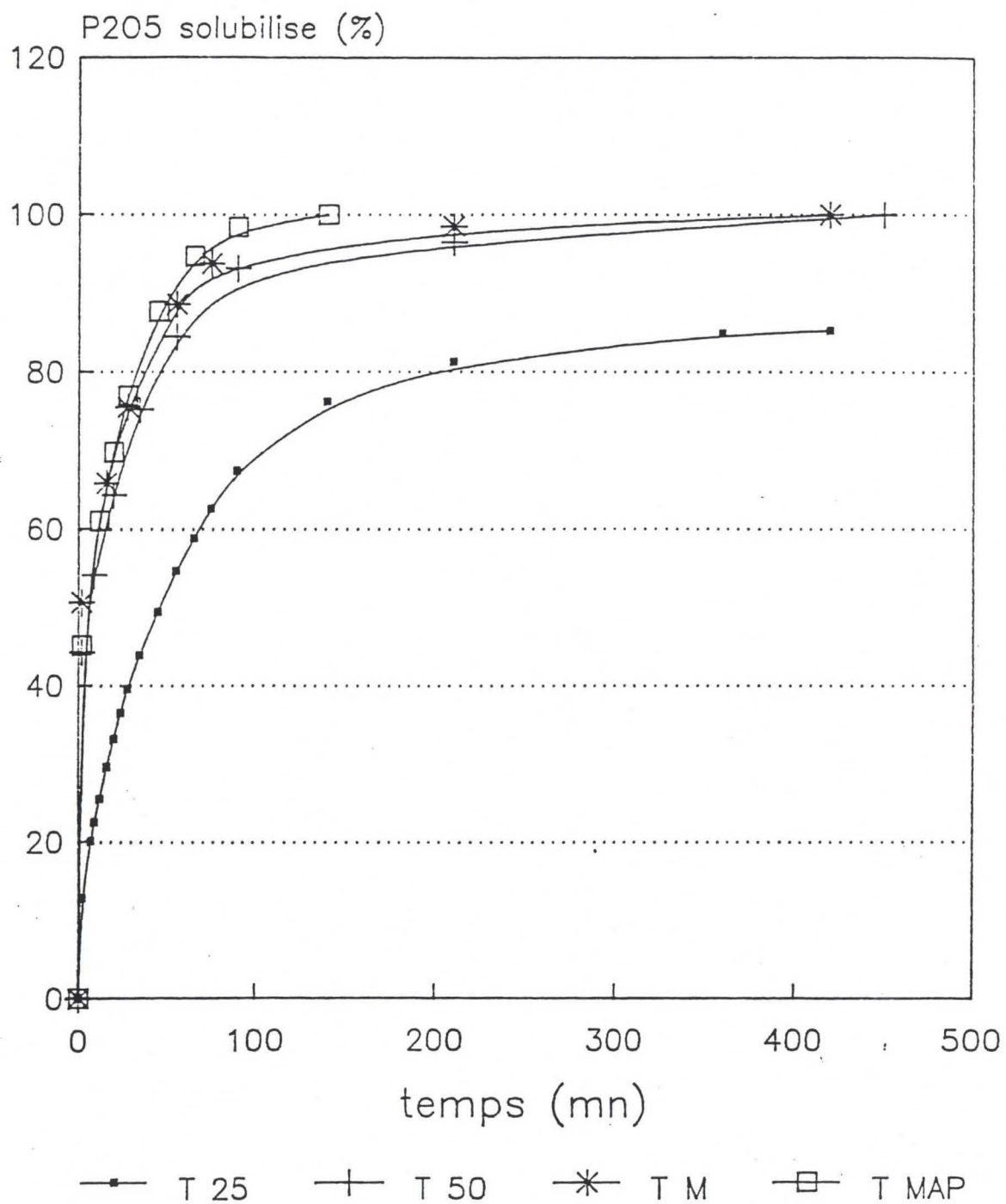
FIG. 4 - SOLUBILITE PHOSPHORIQUE DES PRODUITS DU TOGO

FIG. 5 - PHASE DE PREPARATION DES PRODUITS SOLIDES

Phase de préparation des produits solides

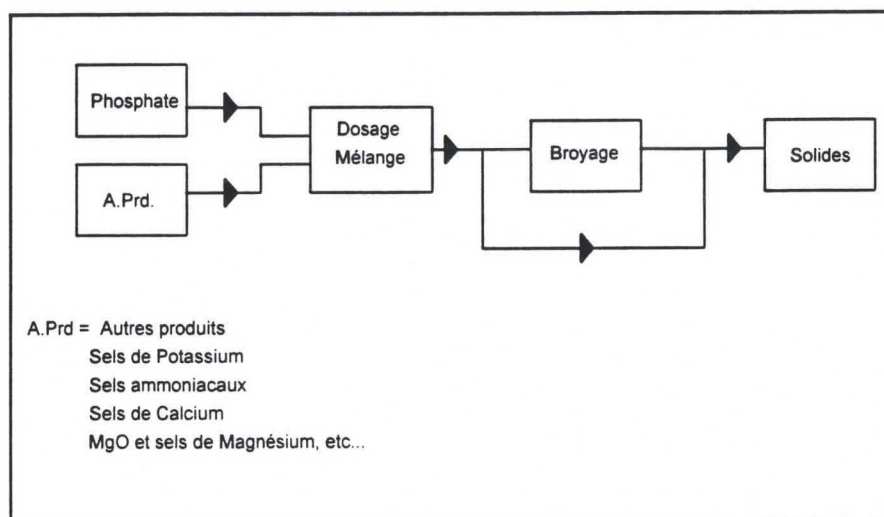
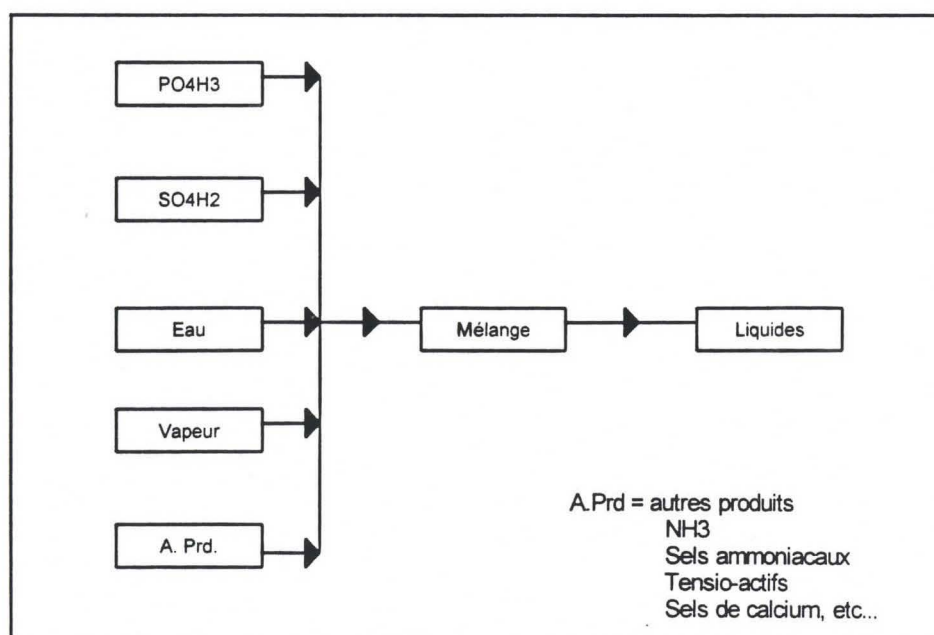
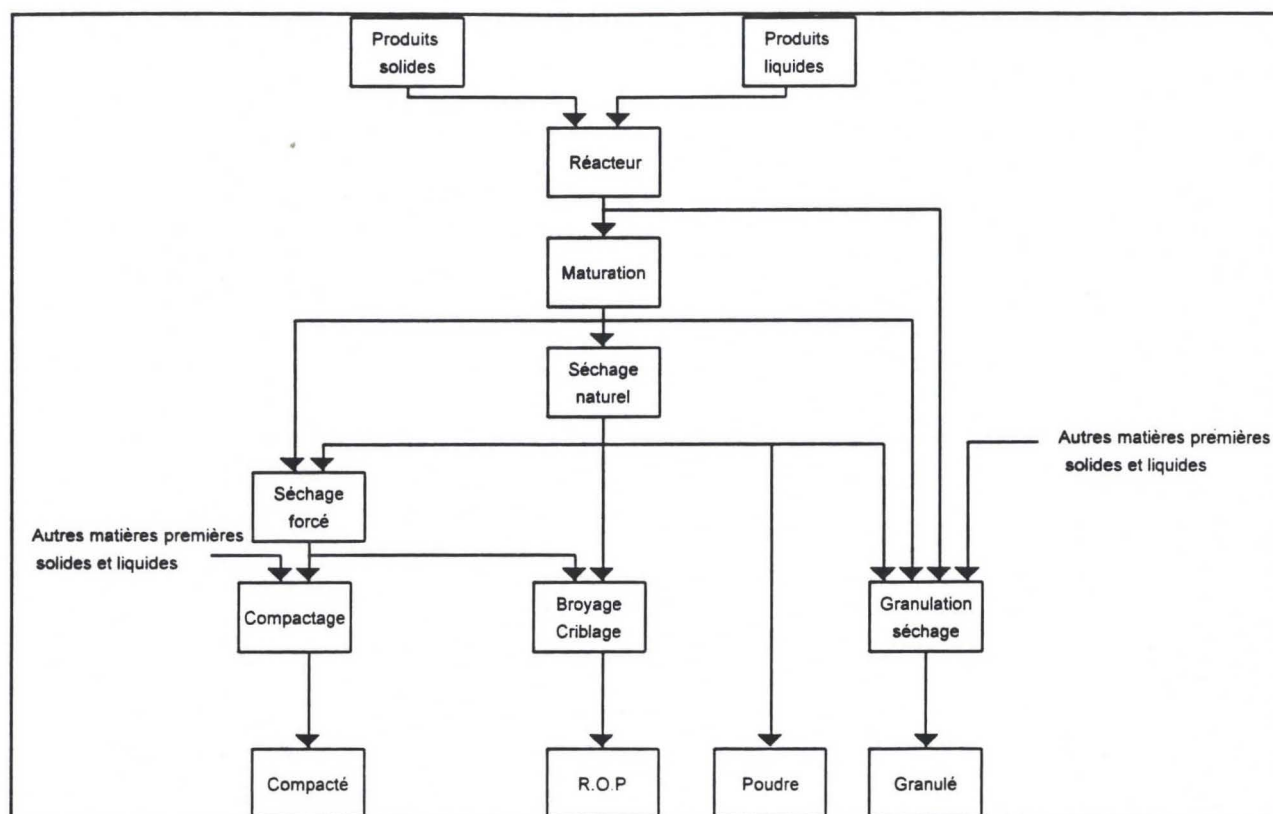
**FIG. 6 - PHASE DE PREPARATION DES PRODUITS LIQUIDES**

FIG. 7 - SOLUBILISATION ET GRANULATION



TAB. 5 - PHASES MINERALES REPRESENTEES DANS LES PRODUITS ISSUS D'ATTAQUES PARTIELLES

ECHANTILLON	SULFATES DE CALCIUM			PHOSPHATES		
	GYPSE	BASSANITE	ANHYDRITE	MONOCAL -CIQUE	MONOAM- MONIQUE	DE FER
KODJARI :						
Att. Sulf. 23 %	*	*				
Att. Sulf. 33 %	*	*	*			
Att. Sulf. 40 %	*	*	*			*
Att. Sulf. 48 %	*	*	*			*
Att. Mixte 50 %		*		*		*
Att. Phos. 18 %						*
Att. Complexe 33 %	*				*	*
Att. Complexe 17 %		*			*	
TILEMSI :						
Att. Sulf. 22 %	*	*				
Att. Sulf. 29 %	*	*	*			
Att. Sulf. 45 %		*	*			*
Att. Sulf. 52 %		*	*			*
Att. Phos. 42 %				*		
Att. Compl. 29 %	*				*	
Att. Compl. 22 %	*	*			*	
ANECHO :						
Att. Sulf. 23 %		*	*			
Att. Sulf. 44 %		*		*		
Att. Mixte 57 %		*	*	*		
Att. Complexe 27 %	*				*	

5. PROJETS INDUSTRIELS

Des études techniques et économiques ont été réalisées, selon la démarche décrite précédemment, au BURKINA FASO en 1987 et 1992 (7, 20), au MALI en 1993 (21), pour évaluer la faisabilité des petites unités de production d'engrais à partir des phosphates locaux. Elles devraient être réactualisées suite à la dévaluation du franc CFA, qui risque d'augmenter le coût des équipements achetés à l'extérieur, mais inversement rendre le prix des engrais produits sur place plus compétitifs par rapport aux importations.

5.1. Exemple du Burkina Faso

Le phosphate de Kodjari, par ses caractéristiques intrinsèques, est réputé dur et peu réactif (tab. 1, 2, 3).

Lors des différents essais nous avons constaté que les produits issus d'une attaque mixte ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$) donnaient les meilleurs résultats sur le plan de la solubilité et rendement agronomique, surtout en présence d'ions ammonium (tab. 4).

Mais il est difficile d'envisager de réaliser des attaques phosphoriques pour de petits projets, à cause du prix de l'acide phosphorique, des problèmes de transport et de stockage.

L'idée est de reconstituer de l'acide phosphorique à partir d'autres produits et en présence de l'ammonium.

Il est bien connu que sur le marché des engrais, des produits banalisés comme les phosphates monoammoniques (MAP) ou diammonique (DAP) peuvent être trouvés à des prix particulièrement intéressants, de plus ces produits solides peuvent être transportés facilement et à bas prix (bateaux vrac).

Nous avons donc réalisé dans un premier réacteur spécialement aménagé, le mélange suivant :



Ce mélange est alors additionné au phosphate naturel à attaquer, on constate que

généralement les phases gênantes comme les sulfates de calcium plus ou moins hydratés, les phosphates de fer et d'aluminium sont peu représentés, et que la mobilité du phosphore est considérablement augmentée dans le produit final (tabl. 5).

Le schéma de fabrication est présenté à la figure 8.

L'usine de base comporte six sections principales, dont les objets et fonctions sont décrits brièvement ci-après :

1. Stockage de matières premières, préparation et dosage.

Les phosphates provenant de Kodjari sont stockés en tas. L'acide sulfurique est transporté par wagon citerne spécial d'Abidjan jusqu'à l'usine, stocké dans un réservoir entouré d'un système de sécurité contre les fuites. Les produits solides sont transportés par chemin de fer, en sacs de 500 kg ou 1 T.

2. Réacteur pour la fabrication des phosphates partiellement solubilisés

Le procédé CIRAD-TECHNIFERT utilise un mélange acide sulfurique + MAP pour attaquer les phosphates, le système présenté est en discontinu, permettant un meilleur réglage de l'arrivée des composants, et devient continu à la sortie du réacteur.

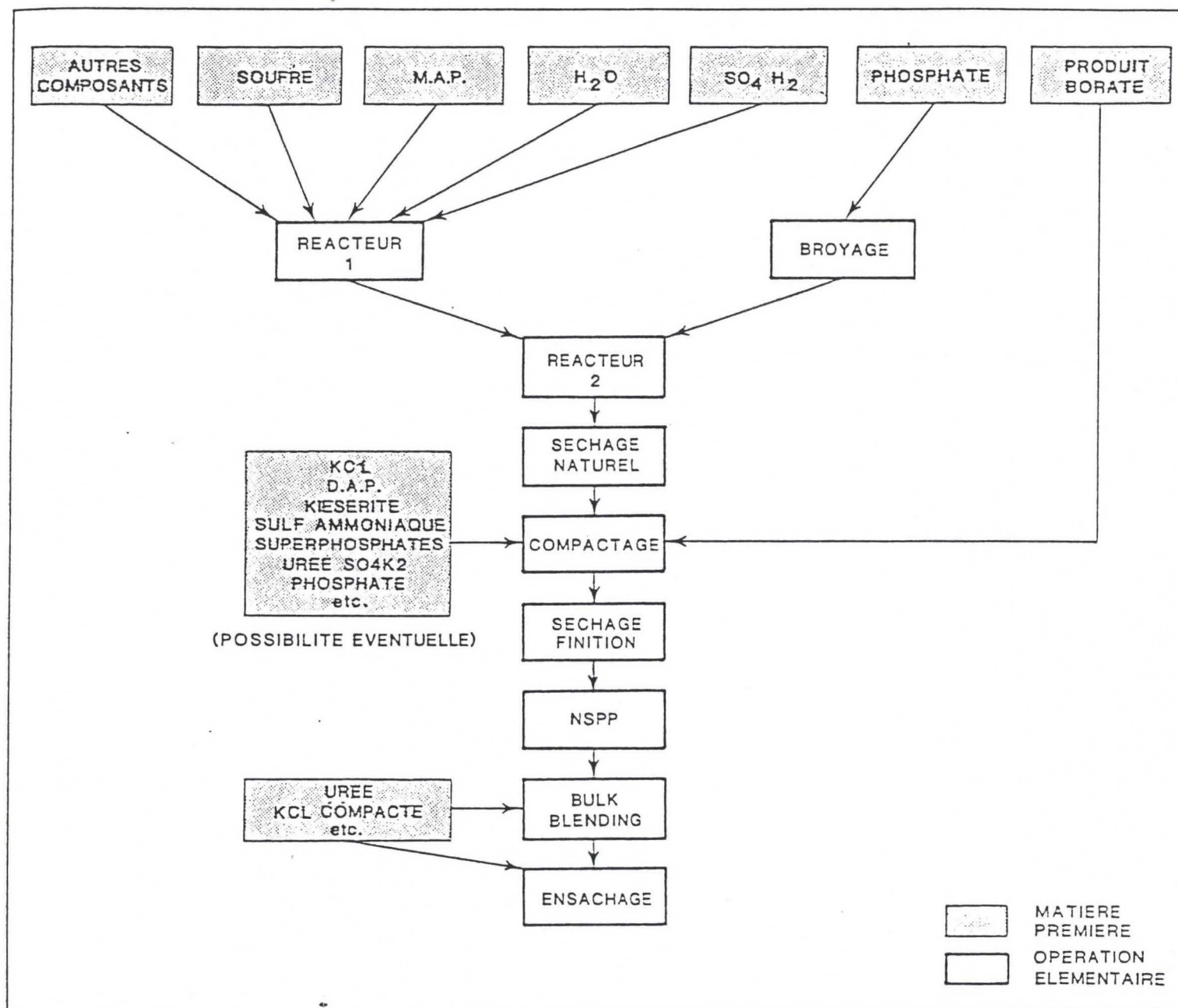
3. Granulation

Le système à plateau donne de bons résultats en unité pilote, permettant un meilleur contrôle par le réglage de la vitesse de rotation, l'angle d'inclinaison du plateau et l'injection de vapeur.

4. Séchage et refroidissement

Les produits à sécher sont injectés dans un cylindre rotatif à air chaud par combustion du fuel, et le passage dure environ 48 minutes. Le refroidissement est assuré par un lit fluidisant, occupant moins de place qu'un cylindre, provoquant moins de brisures donc moins de poussières.

Figure 8 : **SCHEMA DE LA FABRICATION**
(PROCEDE ECOFERT)



5. Criblage et recyclage des fines

Les granules sont séparées par deux tamis : le premier retient les plus grosses qui seront cassées et réintroduites dans le sécheur, le second sépare les fines qui retournent à la section d'alimentation des matières. Le produit criblé passe dans le lit de refroidissement, enrobé avec un produit anti-prise en masse, et stocké, avant l'ensachage.

6. Système de contrôle de pollution

La source principale de pollution est la poussière provenant du broyage, du séchage, du refroidissement, et de la granulation. Elle est captée par des collecteurs solides et réinjectée dans le circuit de fabrication. Les gaz sont récupérés dans des liquides et recyclés.

La chaîne de production comporte 2 étapes :

- L'attaque partielle du phosphate de Kodjari donne un produit de base ayant approximativement la composition suivante : 1,5 N - 26,5 P_2O_5 - 28,2 CaO - 3,2 S.
- A ce produit de base s'ajoutent des compléments azotés, potassiques, boriques... pour aboutir à des engrais complexes granulés, adaptés à chaque culture.

Pour un investissement de l'ordre de 1,3 milliards de F CFA, on pourrait produire : 46 500 T de produit de base, au prix de 54 500 F CFA/T soit 60 500 T d'engrais complexes, au prix moyen de 60 400 F CFA/T.

Mais la comparaison des coûts avec la fertilisation actuelle devrait être effectuée à unités fertilisantes équivalentes apportées à l'hectare, les résultats sont présentés au tableau 6.

On constate que les nouvelles formules sont plus économiques, en moyenne de 24 %, par rapport aux formules actuelles.

TAB. 6 - BURKINA FASO - COMPARAISON DES COUTS DES ENGRAIS APPORTES A L'HECTARE

(calcul de mars 1992)

CULTURES	UNITES FERTILISANTES					COUT DES FORMULES EN F CFA		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃	Actuelle	Nouvelle	Variation %
Canne à sucre	140	80	150	17		92200	54424	- 41
Coton	44	34.5	21	9	1.5	20230	17009	- 16
Arachide	14	23		6		10400	6132	- 41
Maïs	60	26	14			19660	16839	- 14
Mil, Sorgho : Zone sèche	14	25				10400	6830	- 34
Zone humide	37	26	14			15030	13381	- 11
Riz pluvial	60	35	18			23471	19479	- 17
Riz irrigué	120	45	23			39320	31178	- 21

5.2. Exemple du Mali

Le phosphate de Tilemsi (PNT) est plus tendre et plus réactif (tab. 1, 2, 3). Les études de solubilisation partielle ont été menées pour augmenter l'effet immédiat et permettre la granulation, mais tous les produits obtenus coûtent plus cher que les phosphates solubles importés, à cause surtout des frais d'approvisionnement en acide. Dans ce cas il vaut mieux utiliser le Tilemsi directement.

En effet, l'ensemble des résultats des essais montre que le PNT a, en moyenne, une efficacité agronomique relative de 80 % par rapport à un phosphate soluble; il serait donc plus facile et plus économique d'ajouter au PNT 20 % de P_2O_5 sous forme soluble pour créer un effet starter et escompter une efficacité équivalente à un phosphate entièrement soluble. Pour avoir une marge de sécurité on pourrait envisager un mélange avec 70 % de P_2O_5 venant du PNT et 30 % d'un phosphate soluble, en l'occurrence le MAP qui est le plus économique actuellement et qui amène aussi de l'azote.

En fait les propositions devraient être modulées en fonction des cultures, de leur rythme d'absorption et de leur exigence. D'autre part il faudrait aussi prendre en compte les variabilités de sols et de climat (pluviométrie), pour avoir le maximum d'efficacité agronomique.

Engrais complexes

Pour rendre le PNT attractif il fallait :

- Augmenter l'efficacité immédiate, c'est l'objet des mélanges avec le MAP pour créer un effet starter qui va faciliter la croissance initiale de la plante et en particulier assurer un meilleur enracinement, qui, en voie de conséquence, explore un volume de sols plus important, intercepte les ions phosphates peu mobiles et utiliser mieux le PNT.
- Eviter la pulvérulence, on pourrait projeter de l'huile, végétale ou minérale, qualité technique la plus économique, ou passer à la granulation mais le coût sera plus élevé, une

comparaison entre deux systèmes sera faite dans le chapitre sur les prix de revient.

- Fabriquer des engrais complexes avec le PNT en ajoutant les compléments azotés, potassiques et autres éléments nutritifs, pour arriver à des formules d'engrais selon des cultures et zones d'utilisation.

Le projet industriel pourrait être développé en différentes étapes, soit :

Etape 1 :

Fabrication d'engrais sous forme pulvérulente, les produits fins étant huilés (cette technique limite considérablement les envolements de poussières lors de l'épandage). Des huiles résiduelles locales pourraient être éventuellement utilisées. Ce produit est très simple à fabriquer et permet une limitation des investissements. Les consommations énergétiques sont aussi faibles.

Etape 2 :

Fabrication dans un deuxième temps d'un engrais granulé par compactage simple. Le produit granulé est beaucoup plus attractif, mais évidemment plus coûteux.

Produits parallèles :

Des petits ateliers utilisant des ressources locales pourraient être développés en parallèle du projet principal, soit :

. Fabrication de compost ex-résidus urbains et déchets d'abattoirs avec génération de Bio-gaz utilisable dans les autres ateliers de production (Atelier de torréfaction de la corne par exemple).

. Fabrication de corne broyée torréfiée, produit extrêmement intéressant en maraîchage et horticulture et exportable.

Ces produits sont extrêmement intéressants au point de vue agronomique, compte tenu des problèmes rencontrés de carence des sols tropicaux en matière organique. Le schéma de fabrication est présenté à la figure 9.

Pour une production d'engrais de 61 440 T/an, les investissements varient selon les options granulés ou non granulés :

	NON GRANULES	GRANULES
Investissement en MF CFA	1150	1550
Prix moyen des engrais en F/T	59493	65943
Taux de rentabilité	76 %	37 %

La comparaison des coûts de fertilisation à l'hectare pour différentes cultures est présentée au tableau 7.

Les nouvelles formules sont en général plus économiques que celles utilisées actuellement,, en moyenne de 24 % pour la forme non granulée et de 20 % pour les granulés.

	NOUVELLES FORMULES			
	NON GRANULEES		GRANULEES	
	FCFA	%	FCFA	%
Coton	- 5010	- 22	- 3720	- 16
Maïs avec complexe coton	- 3792	- 14	- 3017	- 11
avec complexe céréale	- 3512	- 13	- 2737	- 10
Arachide-mil-sorgho				
avec complexe coton	- 5079	- 42	- 4434	- 37
avec complexe céréale	- 4799	- 41	- 4154	- 35
Riz avec DAP	- 390	- 1	+ 900	+ 3
avec complexe céréale	- 17663	- 37	- 16383	- 35

6. CONCLUSION

La consommation des engrais en Afrique de l'Ouest est très faible et ne compense pas (13 %) les exportations des éléments nutritifs par les cultures, ce qui risque d'entraîner à terme une dégradation de la fertilité des sols.

La valorisation des ressources locales, phosphates naturels, amendements minéraux et organiques, résidus des industries agro-alimentaires, des ordures ménagères, des abattoirs... pourrait constituer une solution abordable et économique, à condition qu'elles soient transformées en engrais efficaces, avec une présentation attrayante, à un prix compétitif avec les produits importés.

Il n'existe pas de solution générale, pour chaque cas il faudrait une mise au point spécifique, en tenant compte des caractéristiques des matières premières, des conditions d'utilisation, et en rechercher la meilleure adéquation. Ainsi pour le phosphate de Kodjari, il faudrait passer par une solubilisation partielle alors que le phosphate de Tilemsi pourrait être utilisé directement, avec une amélioration de la présentation.

La comparaison de coût de fertilisation à l'hectare, montre que les nouvelles formules sont en général moins cher que celles existantes, de 20 à 24 %. la rentabilité pourrait être de l'ordre de 37 % par rapport au capital investi. Mais les impacts sur l'économie régionale sont très importants, valorisation des ressources locales, développement des transports, des nouvelles activités complémentaires à l'usine d'engrais.

BIBLIOGRAPHIE

1. BAUDET G., TRUONG B., FAYARD C., SUSTRAC G. (1986) - La filière phosphate : du minéral à l'engrais, principaux points de repère -Chron. Rech. Min. N° 484 : 19-36.
2. BOUYER S., (1954) - L'emploi des phosphates de Thies dans l'agriculture sénégalaise. C.R. 2ème Conf. Intern. Afr. des sols; Léopoldville, Congo Belge.
3. CHIEN S.H., BLACK C.A. (1975) - The activity concept of phosphate rock solubility, Soil Sci. Am. J. 39 : 856-858.
4. CHIEN S.H., HAMMOND L.L. (1978) - A comparison of laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. Soil Sci. Soc. Am. J. 42 : 935-939.
5. ELLIS R., QUADER M.A., TRUONG E. (1955) - Rock phosphate availability as influenced by soil pH, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19 : 484-487.
6. GAKOU A., CHIEN S.H., VAN KAUWENBERGH S.J., POLO J., TRUONG B. (1993) - Development of phosphate rock resources of sub-saharian Africa. Scope workshop on sustainable land management for the semi-arid regions in Africa, Dakar, Senegal, Nov. 1993, 45 p.
7. IFDC-CIRAD-TECHNIFERT (1992) - Etude de préféabilité pour une production d'engrais au Burkina Faso à partir des phosphates de Kodjari. Rapport Banque Mondiale. Projet Engrais Vivriers, 91 p.
8. JADIN P., TRUONG B., (1987) - Efficacité de deux phosphates naturels tricalciques dans deux sols ferrallitiques acides du Gabon. Café cacao thé, 31 (4) : 291-302.
9. KHASAWNEH F.E., DOLL E.C. (1978) - The use of phosphate rock for direct application to soils. Adv. Agron. 30 : 159-206.
10. LEHR J.R., Mc CLELLAN G.H. (1972) - A revised laboratory reactivity scale for

evaluating phosphate rocks for direct application. TVA Bull. Y-43, NFDC, Muscle Shoals, Alabama.

11. NABOS J., CHAROY J., PICHOT J., (1974) - Fertilisation phosphatée des sols du Niger - Utilisation des phosphates naturels de Tahoua. *Agro. Trop.* 29, 11, 1140-1150.
12. PAUL I. (1988) - Caractérisation physico-chimique et évaluation de l'efficacité agronomique de phosphates bruts ou partiellement acidifiés provenant d'Afrique de l'Ouest. Thèse Doct. Sci. INPL, Nancy, 296 p.
13. PICHOT J. TRUONG B., TRAORE A., (1982) - Influence du chaulage sur la solubilisation et l'efficacité des phosphates naturels tricalciques de l'Afrique de l'Ouest : étude en milieu contrôlé sur un sol ferrallitique de Madagascar. *Agro. Trop.* 37, 1, 56-67.
14. PIERI C., (1967) - Bilan des recherches sur la fumure phosphatée au Mali. C.R. Coll. Fert. Sols Trop., Tananarive, p 1139-1149.
15. ROESCH M., PICHOT J., (1985) - Utilisation du phosphore naturel de Tahoua en fumure de fond et en fumure d'entretien dans les sols sableux du Niger. *Agro. Trop.* N° 2, 89-97.
16. SAMAKE F., (1987) - Contribution à la valorisation du phosphate naturel de Tilemsi (Mali) par l'action d'acides minéraux et de composés organiques humifiés. Thèse doc. Ing. INPL-Nancy, 198 p, Sept 1987.
17. THIBOUT F., TRAORE F., PIERI C., PICHOT J., (1980) - L'utilisation agricole des phosphates naturels de Tilemsi (Mali). *Agro. Trop.* 35, 3, 240-249.
18. TRUONG B., PICHOT J., BEUNARD P. (1978) - Caractérisation et comparaison des phosphates naturels tricalciques d'Afrique de l'Ouest en vue de leur utilisation directe en agriculture. *Agr. Trop.* 33 (2) : 136-145.

19. TRUONG B.; CISSE L. (1985) - Appréciation de la valeur fertilisante des phosphates de Matam (Senegal). *Agro. Trop.* 40 (3) : 230-238.
20. TRUONG B., FAYARD C. (1987) - Proposition d'une filière d'engrais au Burkina Faso, à base de phosphate naturel de Kodjari partiellement solubilisé. Rapport IRAT-DRN, E & A., N° 2, 90 p.
21. TRUONG B., FAYARD C., (1993) - Etude de préfaisabilité pour une production d'engrais au Mali à partir des phosphates de Tilemsi. Rapport CIRAD-TECHNIFERT, 127 p.